

17 Extrakce a vyluhování

Prokop Nekovář, Vladimír Míka

Při kapalinové extrakci uvádíme do styku dvě navzájem omezeně mísitelné kapalně fáze a mezi těmito fázemi dochází k přechodu jedné nebo více složek. Soustředíme se na třísložkovou směs, kdy extrahovaná složka A přechází mezi omezeně mísitelnými rozpouštědly B (přidaným rozpouštědlem) a C (původním rozpouštědlem).

Při vyluhování přecházejí rozpustné složky, původně obsažené v pevné fázi, do kapalného rozpouštědla. V třísložkové směsi vyluhovaná složka A přechází do rozpouštědla B z pevné fáze obsahující nerozpustnou pevnou složku C. Identický popis platí při promývání suspenzí.

Proces budeme považovat za izotermní a izobarický, neprovázený chemickou reakcí. O výpočtech dělení vícesložkových směsí se pojednává ve skriptech [M1] a [N1].

A Výpočtové vztahy

Všechny vztahy uvedené v této části jsou zapsány pro hmotnost a koncentrace vyjádřené pomocí hmotnostních zlomků nebo relativních hmotnostních zlomků. Formálně stejné vztahy platí pro molární a za předpokladu aditivnosti objemů i objemové vyjádření.

17.1 Rovnovážné údaje pro extrakci

17.1.1 Vyjádření složení směsi pomocí hmotnostních zlomků

Označíme x_i hmotnostní zlomek složky i ve fázi rozpouštědla B a y_i hmotnostní zlomek složky i ve fázi rozpouštědla C. Rovnovážný vztah je pro každou složku ($i=A,B,C$)

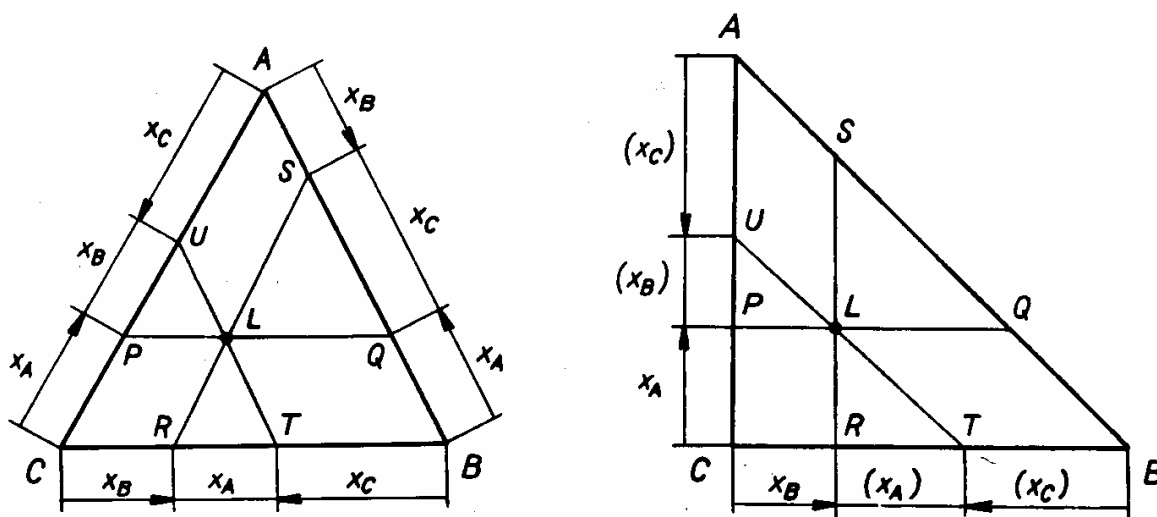
$$y_i = \psi_i x_i \quad (17-1)$$

při splnění vazné podmínky

$$z_A + z_B + z_C = 1 \quad (17-2)$$

kde $z_i = x_i, y_i$ je obecný symbol pro hmotnostní zlomek složky i v obou fázích.

V obecném případě je rovnovážný součinitel ψ_i funkcí složení. Závislost ψ_i na složení směsi může být udávána tabulkou, empirickými vztahy nebo se vyjadřuje na základě termodynamického popisu podílem aktivitních koeficientů složky v obou fázích (viz např. kap. 1 ve skriptu [M1]). V příkladech se odkazujeme na tabulky uvedené ve skriptu [H1], pokud není řečeno jinak. Početní řešení úlohy, kdy ke známému složení jedné fáze se hledá rovnovážné složení druhé fáze, spočívá v numerickém (obvykle iterativním) řešení rovnic (17-1) pro všechny složky s vaznou podmínkou (17-2) (viz např. skriptum [N1]). Pro třísložkové směsi je možné grafické řešení úloh v trojúhelníkovém diagramu.



Obr.17-1. Trojúhelníkový diagram
a – rovnostranný trojúhelník; b – pravoúhlý trojúhelník

Vlastnosti trojúhelníkového diagramu:

a) Složení ternární směsi lze znázornit bodem na diagramu tvaru trojúhelníku (obr.17-1). Vrcholy trojúhelníku A,B,C představují čisté složky. Strany představují binární směsi složek v odpovídajících vrcholech a kterýkoliv bod L uvnitř trojúhelníku představuje směs tří složek. Spojnice $\overline{PQ}$ rovnoběžná se stranou $\overline{BC}$ je geometrickým místem bodů odpovídajících určité hodnotě zlomku x_A ; analogicky spojnice $\overline{RS}$ a $\overline{TU}$ odpovídají hodnotám zlomků x_B , x_C a platí podmínka (17-2). Pro grafické řešení dáváme přednost praktičtějšímu pravoúhlému trojúhelníku před názornějším rovnostranným s kosoúhlou souřadnou sítí.

b) Pro smíšení dvou směsí (nebo rozdělení na dvě směsi) o různém složení platí pákové pravidlo. Z balance ($i=A,B,C$)

$$m_1 + m_2 = m_3 \quad (17-3)$$

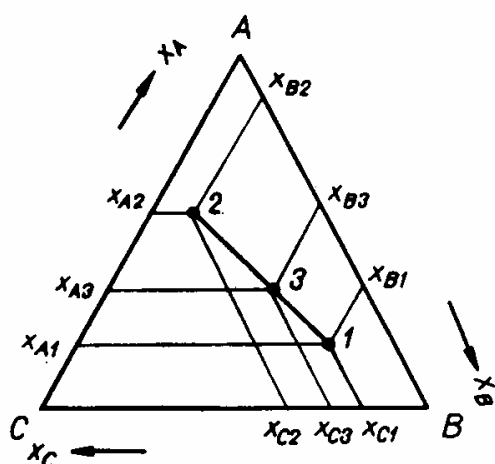
$$m_1 x_{i1} + m_2 x_{i2} = m_3 x_{i3} \quad (17-4)$$

získáme

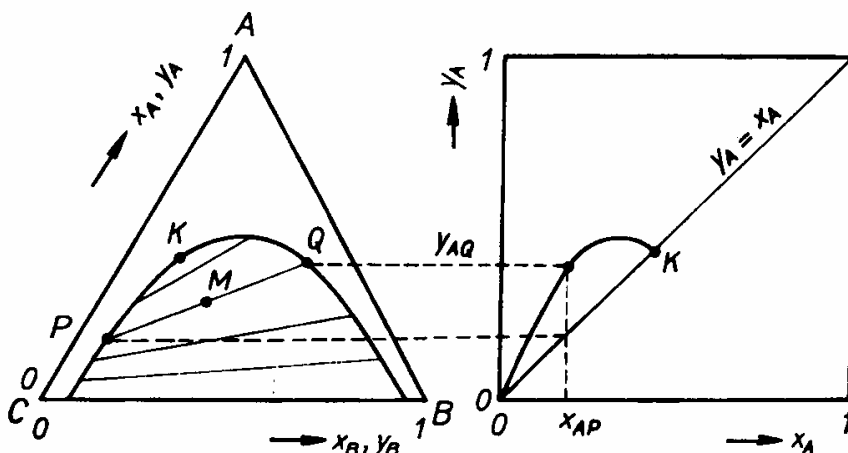
$$\frac{m_1}{m_2} = \frac{x_{i2} - x_{i3}}{x_{i3} - x_{i1}} = \frac{23}{31} \quad (17-5)$$

Na obr. 17-2 představuje bod 3 složení směsi vzniklé ze směsí 1 a 2. Bod 3 leží na úsečce spojující body 1 a 2, které představují složení obou původních směsí, a dělí vzdálenost mezi oběma body v obráceném poměru množství těchto směsí. Obdobně platí

$$\frac{m_1}{m_2} = \frac{x_{i2} - x_{i3}}{x_{i2} - x_{i1}} = \frac{23}{21} \quad (17-6)$$



Obr. 17-2. Pákové pravidlo v trojúhelníkovém diagramu



Obr. 17-3. Zakreslení složení ternární směsi v trojúhelníkovém diagramu a v rozdělovacím diagramu extrahované složky

c) Křivka (křivky) rozpustnosti vymezuje v diagramu dvoufázovou oblast. Body odpovídající rovnovážným koncentracím fází leží na opačných větvích této křivky rozpustnosti (křivkách rozpustnosti) a lze je navzájem spojit přímkou (konodou). Pro jednu křivku rozpustnosti jsou větve odpovídající dvěma fázím odděleny kritickým bodem K (obr. 17-3), kde vlastnosti fází jsou shodné. Na obrázku odpovídají levé větvi křivky rozpustnosti koncentrace x_i , pravé větvi y_i . Obvykle bývá zadáno několik spojovacích přímek. K proložení libovolné spojovací přímky pak kreslíme interpolační křivku tak, aby každému z obou bodů spojovací přímky na křivce rozpustnosti byl jednoznačně přiřazen jeden bod na interpolační křivce, a opačně (viz příklad P17-1).

d) Je-li složení směsi omezeně mísitelných kapalin dáno bodem M uvnitř dvoufázové oblasti (obr. 17-3), rozdělí se při rovnováze na dvě rovnovážné fáze. Body P a Q, znázorňující jejich složení, leží na křivce rozpustnosti a na spojovací přímce procházející bodem M. Mezi body M,P,Q platí pákové pravidlo.

Při grafických řešeních se také používá diagramu závislosti y_A na x_A . Z koncových bodů konod v něm získáváme body rozdělovací (rovnovážné) křivky, která je jednou z forem interpolační křivky. Její konstrukce je zřejmá z obr. 17-3. K určení úplného složení směsi rozdělovací diagram složky A nestačí. Rozdělovací křivky složky B a C jsou však obvykle pro grafické řešení nevhodné.

17.1.2 Vyjádření složení směsi pomocí relativních hmotnostních zlomků

Pro systém s nemísitelnými rozpouštědly B a C používáme relativních hmotnostních zlomků $Z_A = X_A$, Y_A , které jsou definovány takto:

$$X_A = \frac{x_A}{x_C} = \frac{x_A}{1 - x_A} \quad (17-7)$$

$$Y_A = \frac{y_A}{y_B} = \frac{y_A}{1 - y_A} \quad (17-8)$$

Rovnovážný vztah pro složku A má tvar

$$Y_A = \varphi_A X_A = \frac{\psi}{1 - (\psi - 1)X_A} X_A = [\psi_A + (\psi_A - 1) Y_A] X_A \quad (17-9)$$

Z rovnice je patrné, že φ_A obecně závisí na X_A či Y_A a v rozdělovacím diagramu, ve kterém na osy vynášíme Y_A proti X_A , je rovnovážná čára zakřivená (viz obr. 17-6).

17.2 Výpočet extraktorů

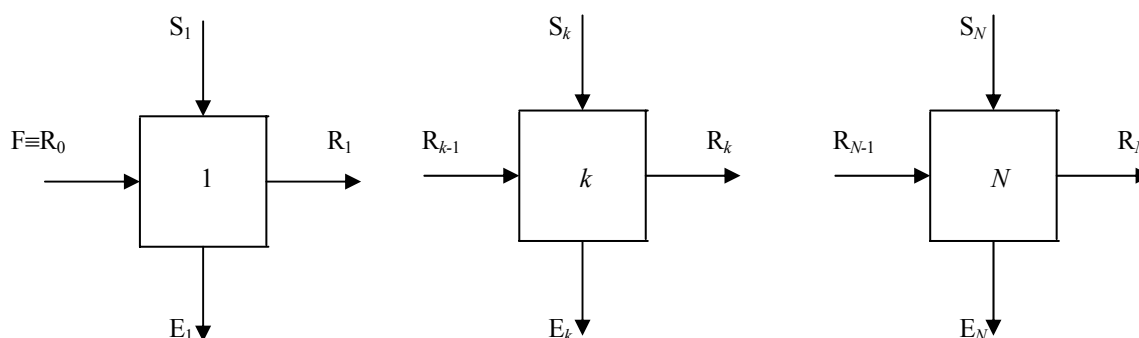
V extraktoru dochází ke smíchání (styku) suroviny (F) a extrakčního rozpouštědla (S) a k rozdělení směsi na dvě fáze, rafinát (R) a extrakt (E). Extrahovaná složka přechází ze suroviny do rozpouštědla. Extrakční rozpouštědlo, obohacené o extrahovanou složku, se nazývá extrakt a ochuzená surovina se jmenuje rafinát.

17.2.1 Jednorázová nebo opakovaná diskontinuální extrakce čerstvým rozpouštědlem

Při výpočtu stupňových extraktorů předpokládáme rovnovážné stupně, tj. fázovou rovnováhu mezi extraktem a rafinátem opouštějícím každý stupeň.

Bilanční vztahy pro stupňové extraktory jsou pro diskontinuální (pokud se po ukončení extrakce nádoba zcela vyprázdní) a ustálený kontinuální proces formálně stejné. Pro jednotlivá uspořádání bude v dalším uvedena vždy jedna z obou alternativ.

Schéma procesu je na obr. 17-4 a bilanční rovnice pro stupeň k jsou v tab. 17-1.



Obr.17-4. Schéma pro bilanci opakované extrakce čerstvým rozpouštědlem

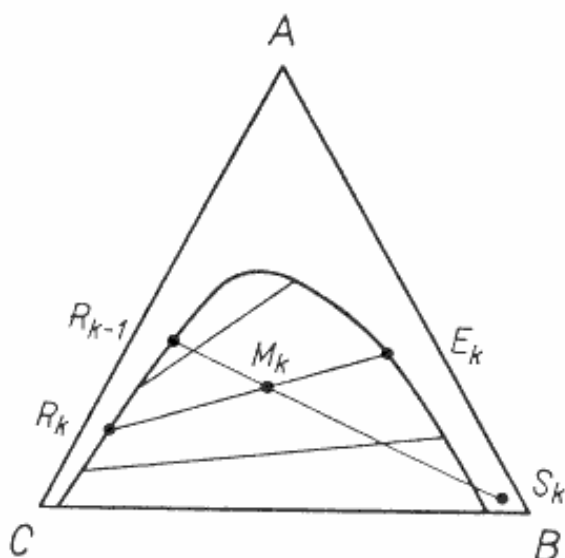
Tabulka 17-1 Hmotnostní bilance směsi a složky i ($i=A,B,C$) pro stupeň k ($k=1,2,\dots,N$) a soustavu N stupňů opakované diskontinuální extrakce

Bilance	Bilanční rovnice	číslo rovnice
směsi	$m_{R(k-1)} + m_{S_k} = m_{R_k} + m_{E_k} = m_{Mk}$	(17-10)
složky i	$m_{R(k-1)} x_{i(k-1)} + m_{S_k} y_{iS_k} = m_{R_k} x_{ik} + m_{E_k} y_{ik} = m_{Mk} x_{iMk}$	(17-11)
směsi	$m_F + m_S = m_{R_N} + m_E = m_M$	(17-12)
složky i	$m_F x_{iF} + m_S y_{iS} = m_{R_N} x_{iN} + m_E y_{iE} = m_M x_{iM}$	(17-13)
	$m_S \equiv m_{S1} + \dots + m_{SN}$	(17-14)
	$m_E \equiv m_{E1} + \dots + m_{EN}$	(17-15)
	$m_E \langle y_{iE} \rangle \equiv m_{E1} y_{i1} + \dots + m_{EN} y_{iN}$	(17-16)
složky A	$m_C x_{A(k-1)} + m_{Bk} y_{ASk} = m_C x_{Ak} + m_{Bk} y_{Ak}$ [za podmínky rovn. (17-21)]	(17-17)
složky A	$m_C x_{A0} + m_B y_{AS} = m_C x_{AN} + m_B \langle y_A \rangle$	(17-18)
	$m_B \equiv m_{B1} + \dots + m_{BN}$	(17-19)
	$m_B \langle y_A \rangle \equiv m_{B1} y_{A1} + \dots + m_{BN} y_{AN}$	(17-20)

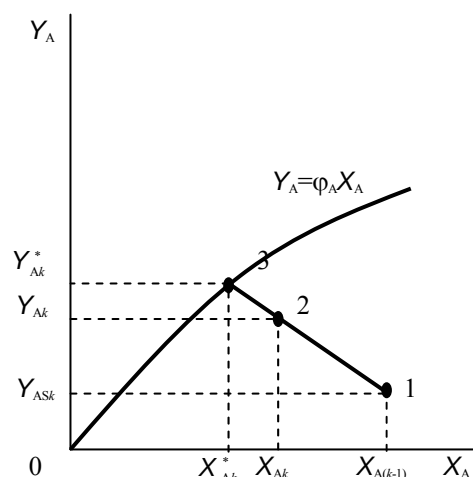
Extrakce tříložkových směsí s omezeně mísitelnými rozpouštědly se řeší graficky v trojúhelníkovém diagramu (viz obr. 17-5). Bilance (17-10) a (17-11) jsou znázorněny úsečkami $\overline{R_{(k-1)}M_kS_k}$ (mísení) a $\overline{R_kM_kE_k}$ (rozdělení). Mezi body úseček platí pákové pravidlo (17-5) a (17-6). Pro rovnovážný stupeň splývá úsečka $\overline{RE}$ se spojovací přímkou.

Složení směsi vyjadřujeme relativními zlomky, když můžeme předpokládat, že

$$x_B = y_C = 0 \quad (17-21)$$



Obr. 17-5. Grafické řešení extrakce ve stupni k v trojúhelníkovém diagramu



Obr. 17-6. Grafické řešení extrakce ve stupni k pro dvě nemísitelná rozpouštědla

V bilancích (17-17) a (17-18) je

$$m_C = m_{R(k-1)} X_{C(k-1)} = m_{Rk} X_{Ck} \quad (17-22)$$

hmotnost čisté složky C v surovině nebo rafinátu a

$$m_{Bk} = m_{Sk} Y_{Bk} \quad (17-23)$$

je hmotnost čisté složky B v přidaném rozpouštědle nebo v extraktu.

V souřadnicích X_A , Y_A získáme z bilance (17-17) rovnici pracovní přímky:

$$Y_{Ak} - Y_{ASk} = - (m_C / m_{Bk}) (X_{Ak} - X_{A(k-1)}) \quad (17-24)$$

Je-li stupeň k rovnovážný, protíná tato přímka rovnovážnou křivku v bodu (X_{Ak}, Y_{Ak}) . Není-li dosaženo rovnovážného stavu (obr. 17-6), je účinnost stupně k

$$E_k = (X_{A(k-1)} - X_{Ak}) / (X_{A(k-1)} - X_{Ak}^*) = (Y_{Ak} - Y_{ASk}) / (Y_{Ak}^* - Y_{ASk}) = (I\bar{2}/I\bar{3}) \quad (17-25)$$

kde X_{Ak}^* , Y_{Ak}^* jsou souřadnice průsečíků pracovní přímky a rovnovážné křivky.

$$Y_{Ak}^* = \varphi_{Ak} X_{Ak}^* \quad (17-26)$$

Řešení bilanční rovnice (17-17) s rovnovážným vztahem (17-26) a definicí účinnosti (17-25) vede k rovnici

$$(X_{Ak} - Y_{ASk} / \varphi_{Ak}) / (X_{A(k-1)} - Y_{ASk} / \varphi_{Ak}) = 1 - \zeta_{Xk} E_k / (1 + \zeta_{Xk}) = 1 - E_k / (1 + \zeta_{Yk}) \quad (17-27)$$

kde faktor výměny hmoty složky A ve stupni k je

$$\zeta_{Xk} = 1 / \zeta_{Yk} = \varphi_{Ak} m_{Bk} / m_C \quad (17-28)$$

Symbol φ_{Ak} v rovnici (17-28) je hodnota odpovídající X_{Ak}^* . Po dosazení $E_k=1$ a $X_{Ak} = X_{Ak}^*$ platí rovnice (17-27) pro rovnovážný stupeň.

Jsou-li konstantní hodnoty

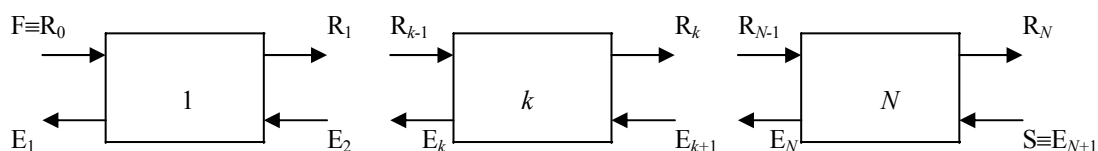
$$\varphi_{Ak} = \varphi_A, m_{Bk} = m_{B1}, Y_{ASk} = Y_{AS}, E_k = E \quad (17-29)$$

pak pro N_s reálných stupňů platí

$$\frac{X_{AN} - Y_{AS} / \varphi_A}{X_{AF} - Y_{AS} / \varphi_A} = \left[1 + \frac{\zeta_X E}{1 + (1 - E)\zeta_X} \right]^{-N_s} = \left[1 - \frac{\zeta_X E}{1 + \zeta_X} \right]^{N_s} = \left[1 - \frac{E}{\zeta_Y + 1} \right]^{N_s} \quad (17-30)$$

17.2.2 Ustálená (kontinuální) extrakce při protiproudu

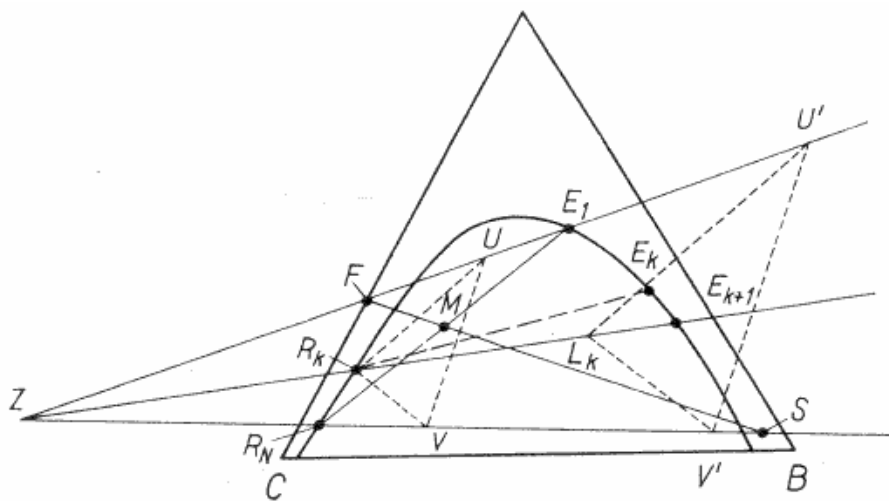
Schéma procesu je znázorněno na obr. 17-7 a bilanční rovnice pro celé zařízení a pro prvních k stupňů jsou uvedeny v tab. 17-2.



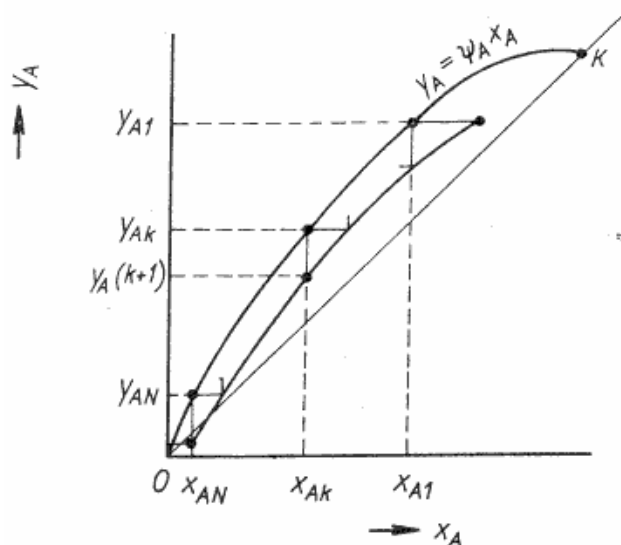
Obr.17-7. Schéma pro bilanci ustálené stupňové extrakce při protiproudu

V trojúhelníkovém diagramu (obr. 17-8) je bilance celého zařízení zakreslena úsečkami $\overline{FMS}$, $\overline{R_N ME_1}$ s použitím směšovacího bodu M a úsečkami $\overline{E_1 FZ}$, $\overline{SR_N Z}$ s použitím diferenčního bodu Z. Mezi body na uvedených úsečkách platí pákové pravidlo. Pro obecný k -tý stupeň je zakreslena bilance úsečkou $\overline{E_{k+1} R_k Z}$ a za předpokladu rovnovážného stupně body R_k a E_k leží na spojovací přímce. Leží-li bod Z mimo náčrt, lze k proložení přímky procházející bodem Z a daným bodem R_k použít pomocnou konstrukci podobných trojúhelníků s rovnoběžnými stranami a vrcholy ležícími na paprscích vycházejících z jednoho bodu. Podle obr. 17-8 zvolíme na přímce procházející body F a E_1 bod U, a na přímce procházející body R_N a S bod V, a sestrojíme trojúhelník UVR_k . Jinde na přímce procházející body F a E_1 zvolíme bod U', na

přímce procházející body R_N a S zakreslíme bod V' tak, aby $UV \parallel U'V'$, a sestrojíme trojúhelník $U'V'L_k$, kde $U'L_k \parallel UR_k$ a $V'L_k \parallel VR_k$. V průsečíku přímky $R_k L_k$ s příslušnou větví křivky rozpustnosti leží bod E_{k+1} a přímka $E_{k+1} R_k$ prochází bodem Z .



Obr.17-8. Grafické znázornění bilancí stupňové extrakce při protiproudu v trojúhelníkovém diagramu



Obr.17-9. Grafická konstrukce k určení koncentrací extrahované složky v jednotlivých proudech stupňového extraktoru při protiproudu

V rozdělovacím diagramu lze grafickou konstrukcí získat koncentrace extrahované složky v jednotlivých proudech kreslením pravoúhlých kroků mezi rovnovážnou a pracovní křivkou (obr. 17-9). Pracovní křivku sestrojíme z několika dvojic souřadnic $(x_{Ak}, y_{A(k+1)})$ odečtených z trojúhelníkového diagramu, kde byly získány již popsanou konstrukcí.

Pro nemísitelná rozpouštědla B a C je vhodné použít k vyjádření složení směsi relativní hmotnostní zlomky. Z bilance prvních k stupňů získáme rovnici

$$Y_{A(k+1)} - Y_{A1} = (\dot{m}_C / \dot{m}_B)(X_{Ak} - X_{AF}) \quad (17-37a)$$

Při grafickém řešení je bilance rovnicí pracovní přímky v souřadnicích X_A , Y_A . Konstrukce pravoúhlých kroků mezi rovnovážnou křivkou a pracovní přímkou je obdobná jako na obr. 17-9 a vede k určení počtu rovnovážných stupňů. Je-li naopak počet rovnovážných stupňů zadán, je třeba zkusmo najít správnou polohu pracovní přímky.

Tabulka 17-2 Hmotnostní bilance směsi a složky i při ustálené (kontinuální) stupňové extrakci při protiproudu
($k=1,2,\dots,N$; $i=A,B,C$.)

Bilancované stupně	Bilance	Bilanční rovnice	číslo rovnice
1 až N	směsi složky i	$\dot{m}_F + \dot{m}_S = \dot{m}_{RN} + \dot{m}_{E1} = \dot{m}_M$ $\dot{m}_F X_{iF} + \dot{m}_S Y_{iS} = \dot{m}_{RN} X_{iN} + \dot{m}_{E1} Y_{i1} = \dot{m}_M X_{iM}$	(17-31) (17-32)
1 až k	směsi složky i	$\dot{m}_F - \dot{m}_{E1} = \dot{m}_{Rk} - \dot{m}_{E(k+1)} = \Delta \dot{m}$ $\dot{m}_F X_{iF} - \dot{m}_{E1} Y_{i1} = \dot{m}_{Rk} X_{ik} - \dot{m}_{E(k+1)} Y_{i(k+1)} = \Delta \dot{m}_i$	(17-33) (17-34)
1 až N 1 až k k až N	složky A	$\dot{m}_C X_{AF} + \dot{m}_B Y_{AS} = \dot{m}_C X_{AN} + \dot{m}_B Y_{A1} = \dot{m}_{AM}$ $\dot{m}_C X_{AF} - \dot{m}_B Y_{A1} = \dot{m}_C X_{Ak} - \dot{m}_B Y_{A(k+1)} =$ $= \dot{m}_C X_{AN} - \dot{m}_B Y_{AS} = \Delta \dot{m}_A$ [za podmínky rovn.(17-21)]	(17-35) (17-36)

Numerický postup řešení úloh s rovnovážnými stupni se při ručním výpočtu zjednoduší, když se místo postupného řešení bilance a rovnováhy dosadí rovnovážný vztah do bilance. Po úpravě dostáváme

$$X_{A(k-1)} = \zeta_{Xk} X_{Ak} + X_{AF} - Y_{A1} (\dot{m}_B / \dot{m}_C) = \zeta_{Xk} X_{Ak} + X_{AN} - Y_{AS} (\dot{m}_B / \dot{m}_C) \quad (17-37b)$$

nebo

$$Y_{A(k+1)} = \zeta_{Yk} Y_{Ak} + Y_{A1} - X_{AF} (\dot{m}_C / \dot{m}_B) = \zeta_{Yk} Y_{Ak} + Y_{AS} - X_{AN} (\dot{m}_C / \dot{m}_B) \quad (17-37c)$$

kde $k = 1, \dots, N$.

Hledá-li se neznámý počet rovnovážných stupňů, vypočte se ze známé hodnoty koncentrace extrahované složky v některém z výstupních proudů hodnota pravé strany rovnice (17-37b,c). Zjistí se tak hodnota koncentrace v proudu ze sousedního stupně. Té se využije k opětovnému určení hodnoty pravé strany rovnice a tak se pokračuje, dokud se nedospěje k hodnotě koncentrace v proudu na druhém konci extraktoru. Potřebný počet opakování výpočtu je hledaný počet rovnovážných stupňů. Je-li zadána funkce $\varphi_{Ak}(X_{Ak})$, použije se rovnice (17-37b), pro funkci $\varphi_{Ak}(Y_{Ak})$ je vhodná rovnice (17-37c).

Pokud je počet stupňů zadán, hledá se neznámé složení výstupních proudů z extraktoru. Pak se zapíše bilance pro každý stupeň a získá se tolik rovnic, kolik je neznámých koncentrací. Není-li rovnovážný poměr konstantní, jedná se o soustavu nelineárních rovnic, která se řeší na počítači např. Newtonovou metodou. Při ručním výpočtu se využívá faktu, že faktor výměny hmoty se s koncentrací mění méně než samotná koncentrace extrahované složky.

Změny koncentrací složky A ve skutečném stupni lze určit na základě Murphreeovy účinnosti

$$E_{Xk} = \frac{X_{A(k-1)} - X_{Ak}}{X_{A(k-1)} - Y_{Ak} / \varphi_{Ak}} \quad (17-38)$$

$$E_{Yk} = \frac{Y_{Ak} - Y_{A(k+1)}}{\varphi_{Ak} X_{Ak} - Y_{A(k+1)}} \quad (17-39)$$

Při zadané hodnotě E_{Xk} výpočet od stupně ke stupni vychází z určení rovnovážné hodnoty $X_{Ak}^* = Y_{Ak} / \varphi_{Ak}$, nalezení hodnoty X_{Ak} z definice účinnosti (17-38) a určení hodnoty $Y_{A(k+1)}$ z bilance (17-37) postupně pro $k=1, \dots, N$. Při zadané hodnotě E_{Yk} výpočet vychází z určení rovnovážné hodnoty $Y_{Ak}^* = \varphi_{Ak} X_{Ak}$, nalezení hodnoty Y_{Ak} z definice účinnosti (17-39) a určení hodnoty $X_{A(k-1)}$ z bilance (17-37) postupně pro $k=N, \dots, 1$. Tomu odpovídají rovnice:

$$\begin{aligned} X_{Ak} &= X_{A(k-1)} - E_{Xk} (X_{A(k-1)} - Y_{Ak} / \varphi_{Ak}) \\ Y_{A(k+1)} &= Y_{A1} - (\dot{m}_C / \dot{m}_B)(X_{AF} - X_{Ak}) \end{aligned} \quad (17-40a)$$

a

$$\begin{aligned} Y_{Ak} &= Y_{A(k+1)} + E_{Yk} (\varphi_{Ak} X_{Ak} - Y_{A(k+1)}) \\ X_{A(k-1)} &= X_{AF} - (\dot{m}_B / \dot{m}_C)(Y_{A1} - Y_{Ak}) \end{aligned} \quad (17-40b)$$

případně podle [M1]

$$\begin{aligned} X_{A(k-1)} &= \varepsilon_{Yk} X_{Ak} + E_{Yk} (\Delta \dot{m}_A / \dot{m}_C) \\ Y_{A(k+1)} &= \varepsilon_{Xk} Y_{Ak} + E_{Xk} (\Delta \dot{m}_A / \dot{m}_B) \end{aligned} \quad (17-40c)$$

kde $\Delta \dot{m}_A$ plyne z rovn.(17-36) v tab.17-2 a veličina ε je definována takto

$$\varepsilon_{Zk} = 1 - E_{Zk} [1 - (1/\zeta_{Zk})] \quad [Z = X, Y] \quad (17-40d)$$

Při numerickém řešení se do rovnice (17-38) dosazuje hodnota φ_{Ak} odpovídající hodnotě Y_{Ak} a do rovnice (17-39) se dosazuje hodnota φ_{Ak} odpovídající hodnotě X_{Ak} . Jestliže je $E_{Xk} = E_{Yk} = 1$, pak $Y_{Ak} = \varphi_{Ak} X_{Ak}$.

Postup grafického řešení je ukázán na obr. 17-10. Podle něj je např.

$$E_{X1} = \frac{\overline{AB}}{\overline{AC}} = \frac{X_{A0} - X_{A1}}{X_{A0} - X_{A1}^*} = \frac{X_{AF} - X_{A1}}{X_{AF} - X_{A1}^*}$$

$$E_{YN} = \frac{\overline{MN}}{\overline{MO}} = \frac{Y_{AN} - Y_{A(N+1)}}{Y_{AN}^* - Y_{A(N+1)}} = \frac{Y_{AN} - Y_{AS}}{Y_{AN}^* - Y_{AS}}$$

Místo postupného řešení rovnic bilance a účinnosti stupně je možné obě rovnice spojit dohromady. K řešení na počítači je vhodný tvar

$$(\zeta_{X(k+1)} / E_{X(k+1)}) X_{A(k+1)} - [\mu_{X(k+1)} + (\zeta_{Xk} / E_{Xk})] X_{Ak} + \mu_{Xk} X_{A(k-1)} = 0 \quad (17-41a)$$

nebo

$$(\zeta_{Y(k-1)} / E_{Y(k-1)}) Y_{A(k-1)} - [\mu_{Y(k-1)} + (\zeta_{Yk} / E_{Yk})] Y_{Ak} + \mu_{Yk} Y_{A(k+1)} = 0 \quad (17-41b)$$

kde

$$\mu_{Zk} = 1 + \zeta_{Zk} (1 - E_{Zk}) / E_{Zk} = \varepsilon_{Zk} \zeta_{Zk} / E_{Zk} \quad [Z = X, Y] \quad (17-42)$$

Pro $E_{Zk} = 1$ je $\mu_{Zk} = 1$. Pro koncové stupně 0 a N klademe $X_{A0} = X_{AF}$, $E_{X(N+1)} = 1$, $X_{A(N+1)} = Y_{A(N+1)} / \varphi_{A(N+1)}$, $Y_{A(N+1)} = Y_{AS}$, $E_{Y0} = 1$, $Y_{A0} = X_{A0} / \varphi_{A0}$. Rovnice (17-41) je vhodná pro simulační výpočty.

Je-li rovnovážný poměr φ_A konstantní, vede řešení bilanční rovnice (17-37) s rovnovážným vztahem (17-9) pro vystupující proudy z každého stupně ke vztahům pro celkový počet rovnovážných stupňů N :

$$\frac{X_{AN} - Y_{AS} / \varphi_A}{X_{AF} - Y_{A1} / \varphi_A} = \zeta_Y^N \quad (17-43)$$

$$\zeta_Z^N = \frac{1 - \eta_Z / \zeta_Z}{1 - \eta_Z} \quad [Z=X, Y] [\zeta_Z \neq 1] \quad (17-44a)$$

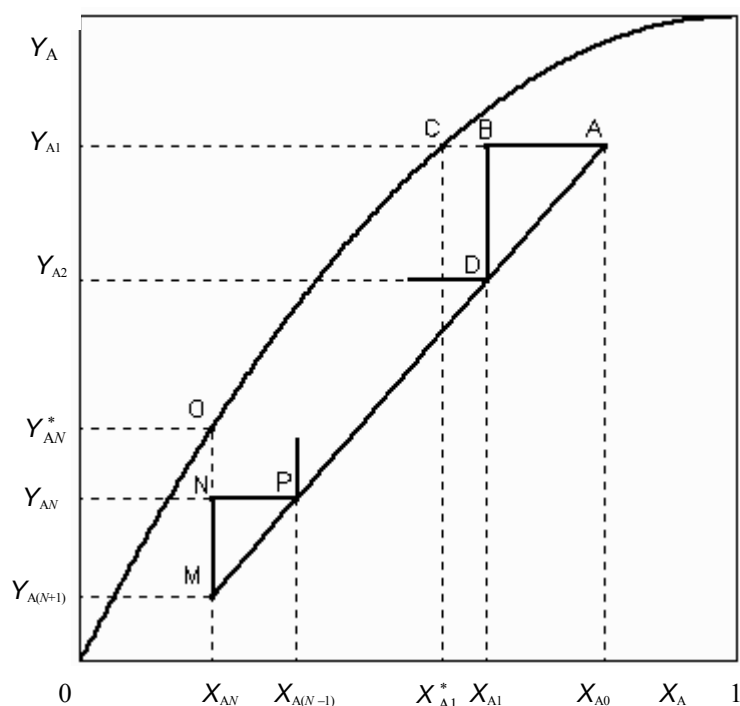
$$\eta_Z = \frac{1 - \zeta_Z^{-N}}{1 - \zeta_Z^{-(N+1)}} \quad [\zeta_Z \neq 1] \quad (17-44b)$$

$$\eta_Z = N / (N + 1) \quad [\zeta_Z = 1] \quad (17-44c)$$

Účinek extraktoru η_X a η_Y je přitom definován takto:

$$\eta_X = \frac{X_{AF} - X_{AN}}{X_{AF} - Y_{AS} / \varphi_A} \quad (17-45)$$

$$\eta_Y = \frac{Y_{A1} - Y_{AS}}{\varphi_A X_{AF} - Y_{AS}} \quad (17-46)$$



Obr.17-10. Grafická konstrukce k určení koncentrací extrahované složky se zadanou účinností stupně při protiproudu, jsou-li rozpouštědla nemísitelná

Platí přepočet

$$\eta_X = \zeta_X \eta_Y \quad (17-47)$$

Vztah mezi počtem rovnovážných stupňů N , konstantním faktorem výměny hmoty ζ_Z a účinkem η_Z z rovnice (17-44) je graficky znázorněn na obr. 15-3 v kap.15 (Absorpce). Umožňuje rychlé a poměrně přesné určení kterékoli z uvedených tří veličin, jsou-li známy hodnoty ostatních dvou.

Rovnic (17-43) a (17-44) je možné použít i pro určení počtu skutečných stupňů, když jsou účinnosti konstantní, přičemž $E_Z < 1$, dosazením za počet rovnovážných stupňů N pomocí celkové účinnosti

$$E_c = N / N_s \quad (17-48)$$

kde N_s je počet skutečných stupňů. Použijeme-li veličiny ε_{Zk} z rovnice (17-40d), pak pro přepočty účinností E_c a E_Z pro konstantní hodnotu faktoru výměny hmoty platí

$$\varepsilon_Z = \zeta_Z^{-E_c} \quad [\zeta_Z \neq 1] \quad (17-49a)$$

$$E_Z = E_c \quad [\zeta_Z = 1] \quad (17-49b)$$

Rovněž platí přepočet

$$E_Y = [1 + \zeta_X (E_X^{-1} - 1)]^{-1} \quad (17-50a)$$

$$E_X = [1 + \zeta_Y (E_Y^{-1} - 1)]^{-1} \quad (17-50b)$$

Jiná varianta vztahů (17-44) je v tab.2.2. ve skriptu [M1].

17.2.3 Extrakce se spojitým stykem fází při protiproudu

Omezíme se na případ vzájemně nemísitelných rozpouštědel B,C (extrahuje se pouze složka A). Složení směsi vyjadřujeme relativními zlomky.

Hmotnostní bilance extrahované složky A (obr. 17-11) pro úsek extraktoru je

$$\dot{m}_C (X_{Ai} - X_A) = \dot{m}_B (Y_{Ae} - Y_A) \quad (17-51)$$

nebo

$$\dot{m}_C (X_A - X_{Ae}) = \dot{m}_B (Y_A - Y_{Ai}) \quad (17-52)$$

Hmotnostní bilance celého extraktoru je

$$\dot{m}_C (X_{Ai} - X_{Ae}) = \dot{m}_B (Y_{Ae} - Y_{Ai}) \quad (17-53)$$

Bilanční rovnice jsou v diagramu X_A, Y_A rovnicemi pracovní přímky.

Výšku účinné části extraktoru vyjádříme pomocí výšky převodové jednotky obsahující koeficient přestupu či prostupu hmoty:

1. Při použití výšky převodové jednotky zahrnující koeficient přestupu hmoty je vztah pro výšku aktivní části extraktoru

$$h = \int_{X_{Ae}}^{X_{Ai}} h_X \frac{1 + X_{Aw}}{X_A - X_{Aw}} dX_A = \int_{Y_{Ai}}^{Y_{Ae}} h_Y \frac{1 + Y_{Aw}}{Y_{Aw} - X_A} dY_A \quad (17-54)$$

kde výšky převodových jednotek jsou

$$h_X = \frac{\dot{m}_R}{Sk_X a} \quad (17-55)$$

$$h_Y = \frac{\dot{m}_E}{Sk_Y a} \quad (17-56)$$

Koncentrace na fázovém rozhraní X_{Aw}, Y_{Aw} se stanoví pomocí rovnice

$$\frac{Y_A - Y_{Aw}}{X_A - X_{Aw}} = -\frac{k_X a}{k_Y a} \frac{1 + Y_A}{1 + X_A} \quad (17-57)$$

kde místo $(k_X a / k_Y a)$ může být $[(h_Y / h_X)(\dot{m}_R / \dot{m}_E)]$.

Funkční závislost $X_{Aw} = X_{Aw}(X_A)$ nebo $Y_{Aw} = Y_{Aw}(Y_A)$ získáme pro jednotlivé body grafickým řešením na rozdělovacím diagramu, jak je to zakresleno na obr. 17-12. Bodem (X_A, Y_A) na pracovní přímce vedeme přímkou danou rovnicí (17-57). V průsečíku této přímky s rovnovážnou čarou získáme bod o souřadnicích (X_{Aw}, Y_{Aw}) .

2. Při použití výšky převodové jednotky zahrnující koeficient prostupu hmoty je vztah pro výšku aktivní části extraktoru

$$h = \int_{X_{Ac}}^{X_{Ai}} H_X \frac{1 + X_A^*}{X_A - X_A^*} dX_A = \int_{Y_{Ai}}^{Y_{Ac}} H_Y \frac{1 + Y_A^*}{Y_A - Y_A^*} dY_A \quad (17-58)$$

kde výšky převodových jednotek jsou

$$H_X = \frac{\dot{m}_R}{SK_X a} \quad (17-59)$$

$$H_Y = \frac{\dot{m}_E}{SK_Y a} \quad (17-60)$$

Když je konstantní rovnovážný poměr, platí pro koeficienty prostupu hmoty

$$1/K_X = (1/k_X) + [1/(\psi_A k_Y)] \quad (17-61a)$$

$$1/K_Y = (1/k_Y) + (\psi_A/k_X) \quad (17-61b)$$

$$K_X = \psi_A K_Y \quad (17-61c)$$

Pro rovnovážné koncentrace X_A^* a Y_A^* platí vztahy

$$Y_A^* = \phi_A X_A \quad (17-62a)$$

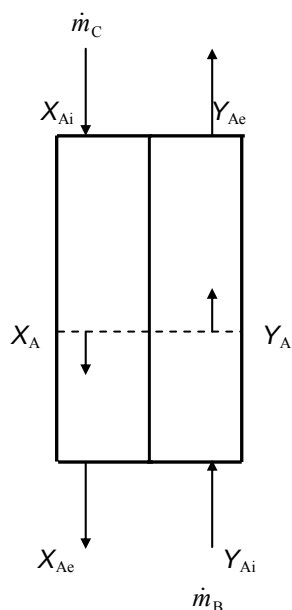
$$X_A^* = Y_A / \phi_A \quad (17-62b)$$

Jejich grafické určení je též zřejmé z obr. 17-12.

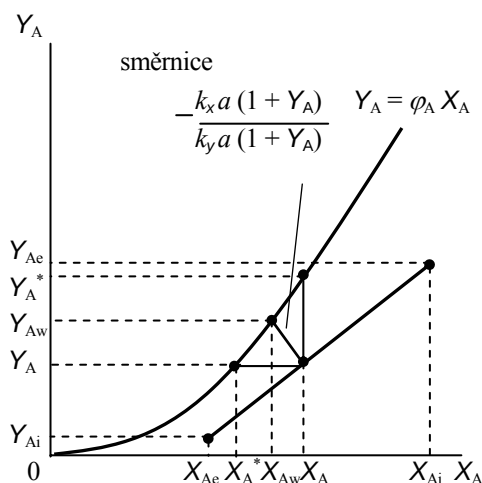
Nemáme-li jednoduché analytické vyjádření závislostí jednotlivých proměnných v uvedených integrálech na koncentraci, podle které integrujeme, řešíme integrál numericky nebo graficky.

Výpočet výšky účinné části extraktoru se zjednoduší, je-li hodnota rovnovážného poměru konstantní. Počet převodových jednotek lze pak určit ze vzorce obsahujícího faktor výměny hmoty a účinek aparátu (viz kap. 15). Hodnota faktoru výměny hmoty nezávisí na způsobu vyjádření koncentrace a při malých hodnotách koncentrace na ní nezávisí ani hodnota účinku.

Pak se počet převodových jednotek pro obyčejné zlomky N_Z dá vypočítat z hodnot $\zeta_Z = \zeta_Z$ a $\eta_Z = \eta_Z$ podle vzorců



Obr. 17-11. Schéma pro bilanci extraktoru se spojitým stykem fází



Obr. 17-12. Grafické určení koncentrace na fázovém rozhraní

$$N_Z [1 - (1/\zeta_Z)] = \ln \{ [1 - (\eta_Z/\zeta_Z)] / (1 - \eta_Z) \} \quad [Z=X,Y][\zeta_Z \neq 1] \quad (17-63a)$$

$$N_Z = \eta_Z / (1 - \eta_Z) \quad [\zeta_Z = 1] \quad (17-63b)$$

Platí

$$N_X = \zeta_X N_Y \quad (17-64)$$

Faktor výměny hmoty je definován rovnicí (17-28)

$$\zeta_X = \varphi_A \dot{m}_B / \dot{m}_C = 1 / \zeta_Y \quad (17-28)$$

a účinek extraktoru analogicky k rovnicím (17-45) a (17-46)

$$\eta_X = (X_{Ai} - X_{Ae}) / [X_{Ai} - (Y_{Ai}/\varphi_A)] = \zeta_X \eta_Y \quad (17-65a)$$

$$\eta_Y = (Y_{Ae} - Y_{Ai}) / (\varphi_A X_{Ai} - Y_{Ai}) \quad (17-65b)$$

Pokud se počítá hodnota účinku ze známých hodnot N_Z a ζ_Z , použije se rovnice

$$\eta_Z = \frac{1 - \exp[-(1 - \zeta_Z^{-1})N_Z]}{1 - \zeta_Z^{-1} \exp[-(1 - \zeta_Z^{-1})N_Z]} \quad [Z=X,Y][\zeta_Z \neq 1] \quad (17-66a)$$

$$\eta_Z = N_Z / (1 + N_Z) \quad [\zeta_Z = 1] \quad (17-66b)$$

Grafickým znázorněním rovnice (17-63) je obr. 15-5 v kapitole 15. Umožňuje rychlý a poměrně přesný výpočet hodnoty libovolné ze tří veličin N_Z , ζ_Z , η_Z z hodnot ostatních dvou.

Výška účinné části extraktoru je součinem výšky a počtu převodových jednotek

$$h = H_Z N_Z \quad (17-67)$$

kde výška převodové jednotky H_Z se počítá podle rovnice (17-59) či (17-60), kam se dosazuje střední hodnota toku fáze.

Vzorců se používá i když hodnota rovnovážného poměru není konstantní. Pak se do vzorce pro výpočet faktoru výměny hmoty a účinku extraktoru dosazuje střední hodnota rovnovážného poměru určená např. ze střední hodnoty koncentrace extrahované složky v extraktu či v rafinátu. Nepřesnost takového výpočtu roste s odchylkou rovnovážné čáry od linearitu.

Výška účinné části extraktoru se též vyjadřuje součinem počtu rovnovážných stupňů N a výšky ekvivalentní rovnovážnému stupni h_e

$$h = N h_e \quad (17-68)$$

kde za uvedených podmínek lze podle rovnic (17-67), (17-68), (17-44a) a (17-63a) výšku ekvivalentní rovnovážnému stupni vyjádřit vztahem

$$h_e = H_Z N_Z / N = H_Z \ln \zeta_Z / [1 - (1/\zeta_Z)] \quad [Z=X, Y][\zeta_Z \neq 1] \quad (17-69a)$$

$$h_e = H_Z \quad [Z=X, Y][\zeta_Z = 1] \quad (17-69b)$$

17.3 Výpočet vyluhovacích aparátů

Schémata procesů, výpočtové vztahy i postupy vyluhování jsou analogické těm, které byly uvedeny v předešlém textu pro extrakci.

17.3.1 Rovnovážné údaje pro vyluhování

Na obr. 17-13a je znázornění rovnováhy typické pro vyluhování. Na osách jsou vyneseny hmotnostní zlomky přecházející složky, x_A , a rozpouštědla, x_B , v pevné fázi a y_A , y_B v kapalně fázi. Pro součet zlomků platí podmínky (17-2). Oblast CGH představuje homogenní pevnou fázi, GHJI heterogenní dvoufázovou oblast a ABIJ homogenní oblast kapalně fáze, když jsou složky A a B neomezeně mísitelné.

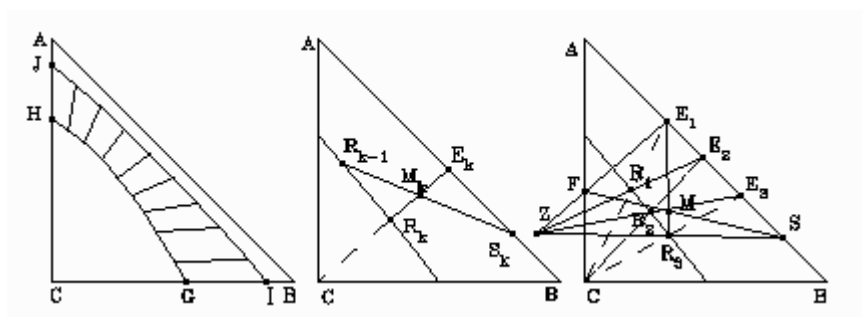
Je-li pevná složka C zcela nerozpustná, splyne čára IJ se stranou trojúhelníku AB a platí

$$y_C = 0 ; y_A + y_B = 1 \quad (17-70)$$

Křivka HG se nazývá křivkou únosu a stanovuje se experimentálně. Únos se zpravidla vyjadřuje jako závislost veličiny

$$u = (x_A + x_B) / x_C \quad (17-71)$$

na zlomku y_A . Je-li veličina u konstantní, je čára HG přímka rovnoběžná se stranou AB trojúhelníku. Konody se rovněž stanovují pokusně. Často se předpokládá, že složení kapaliny v pórech pevné fáze je stejné jako složení rovnovážné kapaliny, tj. $y_i = x_i$. Pak konody procházejí bodem C a rovnovážný vztah lze zapsat pomocí relativních zlomků vztažených na základ tvořený složkami A a B



Obr. 17-13. Grafické znázornění vyluhování v trojúhelníkovém diagramu

- znázornění heterogenní oblasti pevná fáze-kapalina
- vyluhování v obecném rovnovážném stupni k (nerozpustná pevná fáze)
- vyluhování ve třech rovnovážných stupních při protiproudu (nerozpustná pevná fáze)

$$X_i = x_i / (x_A + x_B) ; Y_i = y_i / (y_A + y_B) \quad (i = A, B) \quad (17-72)$$

v jednoduchém tvaru

$$\varphi_A = Y_A / X_A = 1 \quad (17-73)$$

Navíc při platnosti rovnice (17-70) je $y_A + y_B = 1$ a pak

$$Y_A = y_A \quad (17-74)$$

Pro přepočet zlomků v pevné fázi plyne z rovnic (17-71) a (17-72)

$$\begin{aligned} x_i &= X_i (x_A + x_B) = X_i u x_C = X_i u [1 - (x_A + x_B)] = X_i u [1 - (x_i / X_i)] = u X_i / (1 + u) \\ X_C &= x_C / (x_A + x_B) = 1 / u \end{aligned} \quad (17-75)$$

17.3.2 Diskontinuální vyluhování čerstvým rozpouštědlem

Schémata opakovaného vyluhování a opakované extrakce (viz obr. 17-4) jsou stejná. Proud R_k představují pevnou fázi, proudy E_k výluhy a S_k rozpouštědlo. Platí bilanční rovnice (17-10) až (17-16). Za předpokladu, že se ve stupni dosáhne rovnováhy, jsou na obr. 17-13b zakresleny body odpovídající složení jednotlivých bodů pro obecný stupeň k . Mezi body R_k , M_k , E_k a $R_{(k-1)}$, M_k , S_k platí pákové pravidlo. Graf je zakreslen pro předpoklad, že složka C je nerozpustná a složení únosu a výluhu je stejné.

Za předpokladu, že $y_C = 0$, tj. $m_C = x_{Ck} m_{Rk}$ a $y_A + y_B = 1$ a využije-li se rovn.(17-71), lze psát bilanci složek A+B dohromady ve tvaru

$$u_{(k-1)} m_C + m_{Sk} = u_k m_C + m_{Ek} \quad (17-76)$$

a bilanci jednotlivých složek ($i = A, B$)

$$m_C X_{i(k-1)} u_{(k-1)} + m_{Sk} y_{iSk} = m_C X_{ik} u_k + m_{Ek} y_{ik} \quad (17-77)$$

Po dosazení z rovnovážného vztahu (17-73) při platnosti rovnice (17-74) se kombinováním s rovn. (17-76) získá vzorec pro výpočet koncentrace složky A v kapalině:

$$y_{Ak} = \frac{m_C X_{A(k-1)} u_{(k-1)} + m_{Sk} y_{ASk}}{m_C u_{(k-1)} + m_{Sk}} \quad (17-78)$$

Umožňuje postupný výpočet pro $k = 1, \dots, N$, známe-li údaje o vstupních proudech. Z dat o únosu se pro dané hodnoty y_{Ak} získají hodnoty u_k , z bilance (17-76) hodnoty m_{Ek} , z bilance (17-77) hodnoty X_{Ak} , přepočtem podle rovnice (17-75) hodnoty x_{Ak} a z rovnice

$$m_{Rk} = m_C / x_{Ck} \quad (17-79)$$

posléze i hodnoty m_{Rk} .

Když je hodnota u konstantní ($u_k = u$), složení a hmotnost rozpouštědla jsou ve všech stupních stejné. Pak platí rovnice (17-30), kde faktor

$$\zeta_{Xk} = m_{Ek} / (u_k m_C) = 1 / \zeta_{Yk} \quad (17-80)$$

je konstantní pro všechny stupně.

17.3.3 Ustálené stupňové vyluhování při protiproudu

Schéma ustáleného stupňového vyluhování při protiproudu je stejné jako schéma jeho obdoby při extrakci na obr. 17-7 a platí bilanční vztahy (17-31) až (17-34).

Na obr. 17-13c je zakresleno složení jednotlivých proudů když $y_C = 0$, rovnováha se řídí rovnicí (17-73) a dosáhne se jí v každém stupni. Pro konstrukci a uplatnění pákového pravidla platí totéž, co je uvedeno v odd. 17.2.2 pro ustálenou stupňovou extrakci při protiproudu.

Je-li konstantní hodnota veličiny u a jsou zachovány předpoklady (17-70) a (17-73) platí rovnice (17-38) až (17-50) s konstantní hodnotou faktoru výměny hmoty definovaného rovnicí (17-80).

Balance složky A a společná balance složek A a B pro celou soustavu stupňů 0 až N jsou

$$m_C X_{A0} u_0 + m_S y_{AS} = m_C X_{AN} u_N + m_{E1} y_{A1} \quad (17-81)$$

$$m_C u_0 + m_S = m_C u_N + m_{E1} \quad (17-82)$$

Odtud se vypočtou

$$y_{A1} = \frac{m_C (X_{A0} u_0 - X_{AN} u_N) + m_S y_{AS}}{m_C (u_0 - u_N) + m_S} \quad (17-83)$$

$$m_{E1} = m_C (u_0 - u_N) + m_S \quad (17-84)$$

Z empiricky stanovené závislosti únosu u na y_A se určí hodnota u_1 a další koncentrace plynou z rovnovážného vztahu a ze součtové podmínky, tj.

$$u_1 = u_1(y_{A1}) ; \quad X_{A1} = y_{A1} ; \quad y_{B1} = 1 - y_{A1} \quad (17-85)$$

Pro libovolný stupeň k [$k = 1, \dots, N$] platí obdobně

$$m_C X_{A(k-1)} u_{(k-1)} + m_{E(k+1)} y_{A(k+1)} = m_C X_{Ak} u_k + m_{Ek} y_{Ak} \quad (17-86)$$

$$m_C u_{(k-1)} + m_{E(k+1)} = m_C u_k + m_{Ek} \quad (17-87)$$

z čehož

$$y_{A(k+1)} = \frac{m_C (X_{Ak} u_k - X_{A(k-1)} u_{A(k-1)}) + m_{Ek} y_{Ak}}{(u_k - u_{A(k-1)}) m_C + m_{Ek}} \quad (17-88)$$

$$m_{E(k+1)} = m_C (u_k - u_{(k-1)}) + m_{Ek} \quad (17-89)$$

a pak

$$u_{(k+1)} = u_{(k+1)}(y_{A(k+1)}) ; \quad X_{A(k+1)} = y_{A(k+1)} ; \quad y_{B(k+1)} = 1 - y_{A(k+1)} \quad (17-90)$$

Ze střední hodnoty faktoru výměny hmoty

$$\zeta_X = m_E / (u m_C) \quad (17-80a)$$

kde $m_E = (m_{E1} + m_S) / 2$ a hodnota u je pro $y_A = X_A = (X_{A1} + X_{AN}) / 2$, se dá určit počet rovnovážných stupňů v období k rovnici (17-43):

$$\zeta_X^N = (X_{A0} - y_{A1}) / (X_{AN} - y_{AS}) \quad (17-91)$$

B Úlohy

U17-1: Jaké bude látkové množství a složení extraktu a rafinátu po ustavení rovnováhy, smícháme-li 10 mol směsi o složení 40 mol. % vody a 60 mol. % methanolu s čistým trichlorethylenem v množství a) 0,4 mol, b) 4 mol, c) 40 mol. Extrakce probíhá při 20 °C.

Výsledek: Látková množství a složení vzniklých fází jsou uvedena v tab. 17-11. V úloze a) nevznikne fáze extraktu.

Tabulka 17-12 Výsledky U17-1

část úlohy	látkové množ- ství n_R mol	složení rafinátu mol. %			část úlohy	látkové množ- ství n_E mol	složení extraktu mol. %		
		metha- nol	trichlor- ethylen	voda			metha- nol	trichlor- ethylen	voda
a	10,4	57,7	3,8	38,5	a	0	-	-	-
b	9,9	56,2	4,2	39,6	b	4,1	11,8	87,2	1,0
c	7,4	46,6	1,4	52,0	c	42,6	5,9	93,7	0,4

U17-2: a) Jaká bude hmotnost a složení fází po promíchání a ustavení rovnováhy, smícháme-li 5 kg směsi o složení 90 hmotn. % anilinu a 10 hmotn. % cyklohexanu s

1. 2 kg cyklohexanu,

2. 2 kg heptanu.

b) Kolik anilinu s příměsí 8 hmotn. % cyklohexanu a 2 hmotn. % heptanu musíme přidat k 1 kg roztoku o složení 50 hmotn. % heptanu a 50 hmotn. % cyklohexanu, aby právě vznikly dvě fáze? Jaké bude složení těchto fází?

Proces probíhá při 25 °C.

Výsledek:

a) Výsledky obsahuje tab. 17-12.

b) Dvě fáze vzniknou po přidání 0,13 kg daného roztoku.

Tabulka 17-13 Výsledky U17-2

část úlohy	fáze	hmotnost (kg)	složení hmotn. %		
			cyklohexan	anilin	heptan
a1	uhlovodíková	1,16	83,5	16,5	0
	anilinová	5,84	26,2	73,8	0
a2	uhlovodíková	2,34	18,4	8,1	73,5
	anilinová	4,66	1,5	92,5	6,0
b	uhlovodíková		45,2	10,4	44,4
	anilinová		7,2	88,0	4,0

U17-3: Z 5 kg směsi o složení 60 hmotn. % acetonu a 40 hmotn. % vody se má extrahovat při teplotě 25 °C aceton trichlorethanem, který obsahuje 16 hmotn. % acetonu.

- Zjistěte, jaké bude složení a hmotnost extraktu a rafinátu, smísíme-li původní směs s těmito různými hmotnostmi extrakčního činidla: 0,5 kg, 5 kg a 50 kg.
- Zjistěte minimální hmotnost extrakčního činidla, které je nutno přidat, aby právě vznikly dvě fáze.
- Zjistěte maximální hmotnost extrakčního činidla, které je nutno přidat, aby ještě vznikly dvě fáze.

Předpokládejte dosažení fázové rovnováhy.

Výsledek:

- Vznikne 5,5 kg jedné fáze o složení 56 hmotn. % acetonu, 7,6 hmotn. % trichlorethanu, 36,4 hmotn. % vody.
- a2, a3) Výsledky jsou uvedeny v tabulce.
- b, c) Minimální hmotnost rozpouštědla je 0,7 kg, maximální 274 kg.

U17-4: Kolik kilogramů diethyletheru je třeba přidat k 20 kg směsi o složení 75 hmotn. % vody a 25 hmotn. % kyseliny octové, aby koncentrace kyseliny octové v extraktu po dosažení rovnováhy byla 15 hmotn. %? Extrakce probíhá při 25 °C.

Výsledek: Je třeba 12,0 kg diethyletheru.

Tabulka 17-14 Výsledky U17-3

část úlohy	proud	hmotnost kg	složení hmotn. %		
			aceton	trichlorethan	voda
a2	rafinát	2,61	29,1	1,1	69,8
	extrakt	7,39	40,9	56,5	2,6
a3	rafinát	1,78	13,4	0,7	85,9
	extrakt	53,22	20,2	78,9	0,9

U17-5: 13 kg směsi toluenu a 8 hmotn. % acetonu bylo při 20 °C smícháno

- a) se 7 kg vody,
- b) s 25 kg vody.

Po promíchání a ustavení rovnováhy byly vzniklé fáze rozděleny. Určete koncentraci acetonu v obou fázích a množství acetonu v hmotnostních procentech přešlého do vodné fáze.

Výsledek:

- a) Rafinát obsahuje 4,8 hmotn. % acetonu, v extraktu je obsaženo 6,0 hmotn. % acetonu a přešlo do něho 42,6 % acetonu.
- b) Rafinát obsahuje 2,2 hmotn. % acetonu, v extraktu je obsaženo 3,0 hmotn. % acetonu a přešlo do něho 75,1 % acetonu.

U17-6: 6 kg směsi o složení 5,1 hmotn. % acetonu a 94,9 hmotn. % toluenu bylo smícháno s 4 kg vody. Určete

- a) jaké je složení fází po ustavení rovnováhy,
- b) jaká je účinnost extrakčního stupně, obsahuje-li rafinát po oddělení fází 2,9 hmotn. % acetonu.

Extrakce probíhá při 20 °C.

Výsledek:

- a) Extrakt obsahuje 3,6 hmotn. % acetonu a 96,4 hmotn. % vody a rafinát 2,6 hmotn. % acetonu a 97,4 hmotn. % vody.
- b) Účinnost stupně je 90 %.

U17-7: 10 kg vodného roztoku obsahuje 0,8 kg acetonu.

- a) Má se extrahovat 10 kg extrakčního činidla obsahujícího 99,5 hmotn. % o-xylenu a 0,5 hmotn. % acetonu. Určete hmotnost acetonu, který přešel do xylenevé vrstvy.
- b) Kolik kilogramů uvedeného činidla je třeba přidat k dané směsi, aby do extraktu přešlo 50 hmotn. % acetonu. Obě úlohy řešte 1. pro dosažení rovnováhy, 2. pro účinnost stupně 70%.

Extrakce probíhá při 30 °C.

Výsledek:

- a) Při dosažení rovnováhy přejde do xylenevé vrstvy 0,31 kg acetonu a při 70 %ní účinnosti stupně 0,22 kg acetonu.
- b) Při dosažení rovnováhy je třeba přidat 16,3 kg extrakčního činidla, při 70 %ní účinnosti 50,7 kg činidla.

U17-8: Do každého stupně extraktoru přivádíme 7 kg diethyletheru. Extrahujeme 30 kg směsi obsahující 75 hmotn. % vody a 25 hmotn. % kyseliny octové a požadujeme, aby koncentrace kyseliny octové v rafinátu z posledního stupně byla nejvýše 11,5 hmotn. %. Zjistíte potřebný počet stupňů, je-li v každém stupni dosaženo rovnováhy, a spotřebu extrakčního činidla. Extrakce probíhá při 25 °C.

Výsledek: Počet potřebných stupňů je 4 a spotřeba extrakčního činidla 28 kg.

U17-9: 20 kg směsi o složení 75 hmotn. % anilinu a 25 hmotn. % cyklohexanu extrahujeme ve dvou stupních heptanem při 25 °C. Do každého stupně přivádíme 4 kg rozpouštědla s obsahem 4 hmotn. % anilinu. Vypočítejte koncentraci cyklohexanu v rafinátu, hmotnost rafinátu a hmotnost a složení spojených extraktů. Předpokládejte dosažení rovnováhy v každém stupni.

Výsledek: V 15,2 kg rafinátu bude koncentrace cyklohexanu 2 hmotn. % a 12,8 kg spojeného extraktu bude mít toto složení: 37 hmotn. % cyklohexanu, 53 hmotn. % heptanu a 10 hmotn. % anilinu.

U17-10: Má se extrahovat vodou 17 mol směsi trichlorethylenu a methanolu obsahující 52 mol. % trichlorethylenu. Extrahuje se nejprve množstvím 6 mol a ve druhém stupni 4 mol extrakčního činidla. Určete látkové množství rafinátu a koncentraci methanolu v rafinátu. Dále určete množství a složení výsledného extraktu, který vznikne po smíchání extraktů z obou stupňů a po oddělení vzniklé organické fáze. Extrakce probíhá při 20 °C a předpokládá se dosažení rovnováhy v každém stupni.

Výsledek: Látkové množství rafinátu bude 8,6 mol a koncentrace methanolu v rafinátu 1 mol %. Látkové množství výsledného extraktu bude 18,4 mol a extrakt bude obsahovat 44 mol. % methanolu, 54 mol. % vody a 2 mol. % trichlorethylenu.

U17-11: 20 kg směsi o-xylenu a acetonu obsahující 11 hmotn. % acetonu se čistí extrakcí vodou. Požaduje se, aby koncentrace acetonu rozpuštěného v xylenu byla nejvýše 2 hmotn. %. Extrahuje se při 30 °C. Určete

- kolik vody je třeba použít v každém stupni, provádíme-li opakovanou extrakci stejným množstvím vody ve 4 stupních, jaká bude celková spotřeba vody a jaká bude koncentrace acetonu ve spojených extraktech;
 - kolikrát je třeba opakovat extrakci čistou vodou, přidáváme-li jí v každém stupni 5 kg, jaká bude spotřeba vody a jaká bude koncentrace acetonu ve spojených extraktech.
- Předpokládejte dosažení rovnováhy v každém stupni.

Výsledek:

- V každém stupni je třeba použít 7,15 kg vody, celkem tedy 28,6 kg. Koncentrace acetonu ve spojených extraktech bude 6,0 hmotn. %.
- Extrakci je třeba provádět šestkrát. Vody se spotřebuje 30 kg a koncentrace acetonu ve spojených extraktech bude 6,0 hmotn. %.

U17-12: Má se extrahovat 15 kg směsi o složení 7 hmotn. % acetonu 93 hmotn. % vody čistým o-xylenem při 30 °C. Požaduje se, aby koncentrace acetonu v rafinátu nebyla větší než 1 hmotn. %. Určete počet extrakčních stupňů s účinností 0,65, přidává-li se do každého 6 kg o-xylenu, a koncentraci acetonu ve spojených extraktech.

Výsledek: K extrakci je třeba 13 stupňů a koncentrace acetonu ve spojených extraktech je 1,2 hmotn. % acetonu a 93 hmotn.% vody.

U17-13: Z 20 kg roztoku obsahujícího 20 hmotn. % acetonu a 80 hmotn. % o-xylenu je extrahován aceton opakovanou stupňovou extrakcí do vodné fáze. V prvních třech stupních je xylenová fáze kontaktována vždy s 5 kg vodného roztoku acetonu s obsahem 0,5 hmotn. % acetonu. V následujících třech stupních je xylenová fáze kontaktována s 5 kg čisté vody. Extrakce probíhá při 30 °C a předpokládá se účinnost stupně 85 %. Vypočtete hmotnost a složení výsledného rafinátu, spojeného extraktu z prvních tří stupňů a spojeného extraktu ze zbylých stupňů.

Výsledek: Hmotnost výsledného rafinátu je 16,8 kg a rafinát obsahuje 4,6 hmotn. % acetonu a 95,4 hmotn. % o-xylenu. První spojený extrakt má hmotnost 17,2 kg a obsahuje 13,1 hmotn. % acetonu a 86,9 hmotn. % vody. Druhý spojený extrakt má hmotnost 16,1 kg a obsahuje 6,7 hmotn. % acetonu a 96,3 hmotn. % vody.

U17-14: 20 mol s⁻¹ směsi o složení 55 mol. % trichlorethylenu, 42 mol. % methanolu a 3 mol. % vody se extrahuje při protiproudu směsi o složení 12 mol. % methanolu a 88 mol. % vody. Extrakce probíhá při 20 °C. Jaké je potřebné množství extrakčního činidla a počet rovnovážných stupňů, požaduje-li se koncentrace methanolu v rafinátu 1 mol. % a v extraktu 39 mol. %?

Výsledek: K extrakci je zapotřebí 17,5 mol s⁻¹ extrakčního činidla a dva rovnovážné stupně.

U17-15: 30 hmotn. % kyseliny octové ve vodě se extrahuje při protiproudu čistým diethyletherem tak, aby koncentrace kyseliny octové ve vodě klesla na 3 hmotn. % a extrakt obsahoval 17 hmotn. % kyseliny octové. Určete potřebnou výšku vrstvy výplně a spotřebu ethyletheru na 1 kg suroviny. Extrakce probíhá při 25 °C. Výška ekvivalentní rovnovážnému stupni je 0,75 m.

Výsledek: Potřebná výška vrstvy výplně je 2,8 m a na 1 kg suroviny připadá 1,26 kg extrakčního činidla.

U17-16: Do stupňového extraktoru pracujícího při protiproudu se přivádí 0,15 kg s⁻¹ směsi o složení 42,5 hmotn. % acetonu a 57,5 hmotn. % trichlorethanu. Aceton se extrahuje 0,20 kg s⁻¹ extrakčního činidla složeného z 99,5 hmotn. % vody a 0,5 hmotn. % acetonu. Požaduje se koncentrace acetonu v rafinátu maximálně 5 hmotn. %. Extrakce probíhá při 25 °C. Zjistěte

- hmotnostní toky extraktu a rafinátu, složení extraktu a potřebný počet rovnovážných stupňů;
- maximální teoreticky možnou koncentraci acetonu v extraktu, počet rovnovážných stupňů potřebných k dosažení této koncentrace a odpovídající hmotnostní tok extrakčního činidla.

Výsledek:

a) Hmotnostní tok extraktu je $0,26 \text{ kg s}^{-1}$ a rafinátu $0,09 \text{ kg s}^{-1}$. Extrakt má složení 23 hmotn. % acetonu, 76 hmotn. % vody a 1 hmotn. % trichlorethanu, počet rovnovážných stupňů je 5.

b) Maximální koncentrace acetonu v extraktu je 30 hmotn. %, k jejímu dosažení je nutný nekonečný počet rovnovážných stupňů při hmotnostním toku extrakčního činidla $0,14 \text{ kg}$.

U17-17: Ve stupňovém extraktoru se má při protiproudu extrahovat $0,20 \text{ kg s}^{-1}$ vodného roztoku s 8,5 hmotn. % acetonu čistým toluenem tak, aby výtěžek acetonu byl 80 %ní. Extrakce probíhá při 20°C . Vypočítejte

a) minimální spotřebu extrakčního činidla,

b) počet rovnovážných stupňů při spotřebě extrakčního činidla o 40 % větší než minimální,

c) spotřebu rozpouštědla při extrakci ve dvou rovnovážných stupních.

Výsledek:

a) Minimální spotřeba extrakčního činidla je $0,17 \text{ kg s}^{-1}$.

b) Počet rovnovážných stupňů je pro zadanou spotřebu extrakčního činidla 4,0.

c) Spotřeba extrakčního činidla pro dva rovnovážné stupně je $0,41 \text{ kg s}^{-1}$.

U17-18: Ve třech rovnovážných stupních probíhá při protiproudu stupňová extrakce acetonu z vodné fáze do fáze xylenevé. Vstupní vodná fáze obsahuje 7,5 hmotn. % acetonu a extrahuje se o-xylenem s obsahem 0,5 hmotn. % acetonu. Na 1 kg suroviny se spotřebuje 0,8 kg extrakčního činidla. Extrahuje se při 30°C . Určete koncentraci acetonu v rafinátu a extraktu.

Výsledek: Rafinát obsahuje 3,8 hmotn. % acetonu, extrakt obsahuje 5,0 hmotn. % acetonu.

U17-19: Při extrakci acetonu z vodné fáze do fáze toluenové má přejít do extraktu 90 % acetonu. Koncentrace acetonu v surovině je 9 hmotn. %, přiváděná toluenová fáze obsahuje toluen a 0,4 hmotn. % acetonu. Poměr hmotnostních toků suroviny a extrakčního činidla je 0,7. Extrakce probíhá při 20°C . Určete výšku vrstvy výplně, je-li výška ekvivalentní rovnovážnému stupni 0,85 m.

Výsledek: Výška vrstvy výplně je 9,8 m.

U17-20: Ve stupňovém extraktoru se při protiproudu extrahuje aceton z vodného roztoku obsahujícího 16 hmotn. % acetonu do xylenevého extrakčního činidla obsahujícího na vstupu do extraktoru 0,5 hmotn. % acetonu. Rafinát má obsahovat méně než 5 hmotn. % acetonu. Poměr hmotnostních toků vstupujících proudů je roven jedné a extrakce probíhá při 30°C . Pro xylenevou fázi se předpokládá Murphreeova účinnost stupně 80 %. Určete počet potřebných stupňů.

Výsledek: Počet potřebných stupňů je 5.

U17-21: V extraktoru sestávajícím z 10 skutečných stupňů se při protiproudu extrahuje čistou vodou aceton z roztoku obsahujícího 18 hmotn. % acetonu a 82 hmotn. % o-xylenu. Poměr hmotnostních toků vstupujících proudů je 1, extrakce probíhá při 30 °C. Určete složení rafinátu a extraktu, je-li Murphreeova účinnost stupně pro xylenovou fázi 75 %.

Výsledek: Rafinát obsahuje 0,4 hmotn. % acetonu a 99,6 hmotn. % o-xylenu, extrakt obsahuje 15,0 hmotn. % acetonu a 85,0 hmotn. % vody.

U17-22: Určete potřebnou výšku vrstvy výplně z Raschigových kroužků o hustotě povrchu rovné 170 m^{-1} v extraktoru o průměru 0,15 m. Extrahuje se aceton z toluenové do vodní fáze při protiproudu. Vstupní toluenová fáze obsahuje 7,5 hmotn. % acetonu a koncentrace acetonu se má extrakcí snížit na 0,7 hmotn. %. Extrahuje se čistou vodou při teplotě extrakce 20 °C. Přítok toluenové fáze je $0,064 \text{ kg s}^{-1}$, vody $0,120 \text{ kg s}^{-1}$. Pro dané složky a podmínky extrakce je koeficient přestupu hmoty pro rafinátovou fázi $k_x = 0,102 \text{ kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ a pro extraktovou fázi $k_y = 0,051 \text{ kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$.

Výsledek: Potřebná výška vrstvy výplně je 1,6 m.

U17-23: Určete výšku vrstvy výplně v extraktoru, extrahuje-li se při protiproudu aceton z vodného roztoku do o-xylenu. Vstupující vodná fáze obsahuje 6 hmotn. % acetonu a do extraktu z ní má přejít 95 % acetonu. Extrahuje se čistým o-xylenem při 30 °C. Poměr hmotnostních toků suroviny a extrakčního činidla je 0,7. Pro dané složky a podmínky extrakce je výška převodové jednotky vztažená k rafinátu $H_x = 0,65 \text{ m}$.

Výsledek: Potřebná výška vrstvy výplně je 10,9 m.

U17-24: V pokusném extraktoru s výškou vrstvy výplně 3,2 m se při protiproudu extrahoval aceton z vodné do xylenové fáze při 30 °C. Koncentrace acetonu ve vodné fázi na vstupu do extraktoru byla 7,6 hmotn. %, na výstupu 1,3 hmotn. %. Extrahovalo se čistým o-xylenem a na výstupu byla koncentrace acetonu v extraktu 3,1 hmotn. %. Určete výšku převodové jednotky vztaženou k rafinátu.

Výsledek: Výška převodové jednotky $H_x = 0,99 \text{ m}$.

U17-25: Zpracováním bauxitu se získá roztok NaAlO_2 a NaOH spolu s pevnými částicemi. Rozsazením vznikne suspenze obsahující 25 hmotn. % pevné fáze a 75 hmotn. % roztoku NaOH a NaAlO_2 . Složení roztoku se vyjadřuje molární koncentrací iontu Na^+ . Promýváním vodou se má snížit koncentrace Na^+ v suspenzi tak, aby se dosáhlo 90 % výtěžku Na^+ . Po promytí a oddělení suspenze zůstává obsah pevné složky v suspenzi stejný jako na počátku. Pevná složka zůstává všechna v suspenzi. Určete spotřebu vody k promývání 1000 kg pevné fáze

a) v jednom stupni,

b) ve dvou stupních s přívodem stejného množství čerstvé vody do každého stupně,

c) ve dvou stupních při protiproudu fází.

Výsledek: Spotřeba vody k promývání připadající na 1000 kg pevné fáze je při jednostupňovém promytí 27,0 t, při dvoustupňovém opakovaném promývání 13,0 t a při protiproudu 7,62 t.

U17-26: Kopa obsahuje 50 hmotn. % oleje. Ten se vyluhuje při protiproudu ve stupňovém aparátu a poměr hmotností suroviny a vyluhovacího činidla se rovná jedné. Předpokládá se, že olej s rozpouštědlem tvoří 50 % hmotnosti rafinátu, a tato hodnota je během vyluhování konstantní. Po vyluhování se pevná fáze lisuje tak, aby obsahovala 80 hmotn. % sušiny. Ke kapalině odcházející z lisu se přidává čistý hexan a tato směs je vyluhovacím činidlem. Předpokládejte, že pevná fáze je v kapalině nerozpustná. Určete
a) počet rovnovážných stupňů potřebných k tomu, aby v pevné fázi po lisování zůstalo nejvýše 1 % oleje přiváděného v surovině;
b) kolik % původního oleje zůstane po lisování v pevné fázi, má-li aparát 4 rovnovážné stupně.

Výsledek:

- a) K vyluhování je třeba 5 stupňů.
- b) V pevné fázi zůstane 1,3 hmotn. % oleje.

U17-27: Granulovaná platýzová játra obsahují 28 hmotn. % oleje, který se dá vyloužit etherem. Minimálně 90 % oleje přiváděného v surovině má přejít do výluhu, který má obsahovat 50 hmotn. % oleje. Určete potřebný počet rovnovážných stupňů aparátu pracujícího při protiproudu a hmotnost čistého etheru vztaženou na 1 kg suroviny. Pokusně nalezené údaje jsou v tabulce [S1]:

Tabulka 17-15 . Závislost únosu na složení kapaliny

y_A	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7
u	0,19	0,22	0,26	0,31	0,37	0,45	0,55	0,67

kde je y_A hmotnostní zlomek oleje ve výluhu a u je únos, tj. hmotnost unášené kapaliny v rafinátu připadající na jednotkovou hmotnost sušiny.

Výsledek: K požadovanému dělení je třeba tří stupňů a na jeden kilogram suroviny připadá 0,4 kg etheru.

U17-28: Při výrobě hydroxidu sodného se $\text{Ca}(\text{OH})_2$ smíchá s roztokem Na_2CO_3 . Výsledná suspenze se rozsadí, čirý roztok se odtáhne a zbylá suspenze se pak promývá. V původní suspenzi připadá na 1 kg roztoku 0,13 kg pevné fáze, roztok obsahuje 9 hmotn. % NaOH.
a) Suspenze se dvakrát promývá čistou vodou. Hmotnost promývací vody je stejná jako hmotnost čirého roztoku odebraného v předchozí operaci. Určete hmotnostní zlomky NaOH v čirých roztocích odebíraných po každém promývání. Dále určete procenta NaOH obsaženého v původní suspenzi, odpovídající únosu v suspenzi po skončení promývání.

b) Suspenze se promývá při protiproudu. Do posledního stupně se přivádí čistá voda, která má hmotnost stejnou jako je hmotnost čirého roztoku odděleného před promýváním. Ztráty NaOH by neměly být větší než při dvojnásobném promývání čistou vodou podle předešlého zadání (a). Určete potřebný počet promývacích stupňů a hmotnostní zlomek NaOH v promývacím roztoku na výstupu z aparátu.

Předpokládejte dosažení rovnováhy v každém stupni. Rovnovážné složení vrstev (fází) při 25 °C je dáno tabulkou 17-16.

Výsledek: a) Pro čirý roztok z prvního stupně plyne $y_{A1} = 0,022$ a z druhého $y_{A2} = 0,0055$. V suspenzi po skončení promývání zůstává 2,5 % z NaOH v původní suspenzi. b) K promytí je třeba 2,3 rovnovážných stupňů a hmotnostní zlomek NaOH v kapalině odcházející z prvního stupně je $y_{A1} = 0,0273$.

Tabulka 17-16. Rovnovážné složení fází

čirý roztok hmotn. % NaOH	suspenze hmotn. % NaOH	pevná fáze hmotn. %
9,00	6,13	33,11
7,00	5,00	34,50
4,73	3,87	36,02
3,30	2,83	37,20
2,08	1,80	38,50
1,19	1,24	39,39
0,71	0,87	39,72
0,45	0,61	39,98

Poznámka: Z dat je patrné, že se uplatňuje sorpce NaOH.

Literatura

- H1 Holeček O.: *Chemickoinženýrské tabulky*. Skriptum, VŠCHT Praha 1997.
- M1 Míka V., Neužil L.: *Chemické inženýrství II*. Skriptum, VŠCHT Praha 1999.
- N1 Nekovář P.: *Difuzní procesy*. Skriptum VŠCHT, MON Praha 1988.
 Nekovář P.: *Difuzní procesy. Sbíрка příkladů*. Skriptum, ES VŠCHT, Praha 1993.
- S1 Sawistowski H., Smith W.: *Výpočty procesů převodu hmoty*. SNTL, Praha 1969.